



REVUE
DE LA SOCIÉTÉ
DE PHILOSOPHIE
DES SCIENCES

Vol 3 N°1 2016

DOI <http://dx.doi.org/10.20416/lrsps.v3i1.233>

Quentin Ruyant

LE RÉALISME STRUCTURAL FACE AU PROBLÈME DE LA MESURE



SOCIÉTÉ DE PHILOSOPHIE DES SCIENCES (SPS)
École normale supérieure
45, rue d'Ulm
75005 Paris
www.sps-philoscience.org



Quentin Ruyant

LE RÉALISME STRUCTURAL FACE AU PROBLÈME DE LA MESURE

Sommaire



- 1 – Introduction
- 2 – Le réalisme structural épistémique
- 3 – Le réalisme structural ontique
- 4 – Le problème de la mesure
- 5 – Le réalisme structural face au problème de la mesure
- 6 – Peut-on établir un compromis entre l'ESR et l'OSR?
- 7 – Conclusion

Le réalisme structural est une tentative d'établir un compromis entre le réalisme scientifique et l'empirisme, en restreignant le réalisme à la structure relationnelle des théories scientifiques. Il se décline en deux versions, épistémique et ontique. Le réalisme structural ontique propose de concevoir les relations nomologiques décrites par les théories comme des éléments primitifs de la réalité. Il est motivé, notamment, par le fait que sous sa forme épistémique, le réalisme structural ne se distingue pas réellement d'une position empiriste. Cependant, il fait face à des difficultés, en particulier pour différencier relations physiques et mathématiques et rendre compte de l'ancrage expérimental des théories. Il est possible d'établir un parallèle entre ces difficultés et le problème de la mesure en mécanique quantique, qui concerne lui aussi les rapports entre modèle théorique et expérience : on constate alors qu'un réalisme structural épistémique est plus à même d'y répondre. Une solution de compromis entre le réalisme structural ontique et le réalisme structural épistémique pourrait permettre de conserver les avantages des deux positions.

Structural realism attempts to make a compromise between scientific realism and empiricism, by restricting our realist commitment to the relational structure of scientific theories. There are two main versions of the position: ontic, or epistemic. According to ontic structural realism, the nomological relations expressed by theories are the primitive entities of reality. This ontic version is motivated in particular by arguments to the effect that epistemic versions are not really distinct from mere empiricism. However according to some authors, it's not clear that ontic structural realism can differentiate between physical and mathematical relations, and account for the relations between scientific theories and their experimental basis. These difficulties can be related to the measurement problem in quantum mechanics, which also concerns the link between theoretical models and experiments. It appears that epistemic structural realism is in a better position to respond to these difficulties. A compromise between both versions of structural realism could allow us to keep the advantages of both.

Mots clés: réalisme structural, problème de la mesure, mécanique quantique

1 – Introduction

Dans cet article, nous tentons d'explorer les liens possibles entre le réalisme structural et le problème de la mesure en mécanique quantique, et la façon dont ils peuvent s'éclairer mutuellement.

Le réalisme structural est une forme de réalisme scientifique. Le réalisme scientifique peut s'exprimer de manière générale comme la position suivant laquelle nos théories décrivent correctement la réalité. Il peut, par exemple, consister à affirmer que les entités observables ou inobservables postulées par les théories scientifiques existent réellement dans la nature. Le réalisme structural propose de restreindre la thèse réaliste à la structure relationnelle des théories uniquement, c'est-à-dire aux relations nomologiques entre objets ou propriétés, notamment celles portées par les équations des théories, plutôt qu'à ces objets et propriétés eux-mêmes. Initialement d'inspiration empiriste, il a été réintroduit par Worrall dans

le débat contemporain en épistémologie des sciences, afin de répondre à certains arguments antiréalistes et d'établir ainsi un compromis entre réalisme scientifique et empirisme.

La thèse, cependant, a vite été adoptée à d'autres fins, notamment à des fins métaphysiques. Ainsi, certains auteurs proposent d'adopter un réalisme structural ontique (par opposition à épistémique), ou la thèse suivant laquelle la réalité serait essentiellement une structure relationnelle. D'après ses défenseurs, cette position permettrait de résoudre certains problèmes métaphysiques se posant par rapport à la physique contemporaine, et notamment, face à la question de l'individualité des particules en mécanique quantique. Elle se différencierait plus nettement d'une position empiriste que le réalisme structural épistémique, et éviterait ainsi certaines critiques. Cependant, la position ne va pas sans entraîner des difficultés, notamment quant à la façon dont on peut différencier structure mathématique et physique, et rendre

compte de l'ancrage expérimental de nos théories.

Le problème de la mesure, quant à lui, est sans doute le problème d'interprétation central de la mécanique quantique. Il s'agit de la question du rapport entre les modèles théoriques de la mécanique quantique et les mesures expérimentales qui permettent de tester ces modèles. En effet, ces modèles ne permettent pas d'obtenir directement une représentation réaliste des systèmes représentés qui soit compatible avec le fait qu'on obtienne des résultats de mesure déterminés. Il faut donc fournir une interprétation de ces modèles, ou du rapport entre modèle et expérience, afin de combler cette lacune. Plusieurs interprétations sont possibles, mais aucune d'elles n'est entièrement satisfaisante. Le problème de la mesure pose donc un défi pour le réalisme scientifique.

Dans ce contexte, on pourrait penser que l'application du réalisme structural au problème de la mesure s'avérerait instructive, d'une part, parce que les deux sont en relation avec la question du réalisme scientifique, et d'autre part, parce que certaines versions du réalisme structural s'appuient sur la physique contemporaine. Le réalisme structural pourrait donc être à même de proposer soit une ontologie, soit une conception des rapports entre observateur et réalité qui éclairerait le problème de la mesure. De façon surprenante, ces rapports entre réalisme structural et problème de la mesure ont été assez peu explorés jusqu'ici. L'objet de cet article est de combler ce vide.

Dans un premier temps, je présenterai le réalisme structural sous sa forme épistémique, tel qu'il a été initialement introduit dans un cadre épistémologique. Dans un second temps, je m'intéresserai à ses versions ontiques, aux problèmes métaphysiques qu'elles prétendent résoudre ainsi qu'aux difficultés auxquelles elles font face. Ensuite, je porterai mon attention sur le problème de la mesure en mécanique quantique et sur le défi qu'il pose au réalisme scientifique. J'examinerai après de quelle manière le réalisme structural, sous ses différentes formes, peut ou non éclairer le problème de la mesure. Je défendrai l'idée que certains de ses aspects font écho aux difficultés du réalisme structural ontique, et que le réalisme structural épistémique est plus à même de répondre au problème de la mesure. Pour terminer, une position de compromis combinant les avantages de ces deux versions du réalisme structural sera proposée.

2 – Le réalisme structural épistémique

Le réalisme scientifique consiste à adopter une attitude épistémique positive envers le contenu des théories scientifiques, observable ou non, par exemple, en affirmant que les objets, propriétés ou processus postulés par les théories scientifiques (les électrons, les gènes, etc.) existent réellement dans la na-

ture, indépendamment de nous. L'antiréalisme est une forme de scepticisme par rapport à cette position réaliste. Il s'appuie généralement sur des motivations empiristes : si toute connaissance est issue de l'expérience, nous n'avons aucune raison de croire que nous pouvons acquérir une connaissance de la nature fondamentale de la réalité, c'est-à-dire une connaissance allant au-delà de la description de régularités dans les phénomènes directement observables.

La principale motivation du réalisme consiste à rendre compte du succès empirique des sciences, notamment quand les théories sont étendues à de nouveaux domaines d'applications et s'avèrent couronnées de succès. Le réalisme scientifique est à même d'expliquer ce succès par le fait que nos théories décrivent correctement la réalité. L'antiréalisme, quant à lui, ne dispose d'aucune explication convaincante. Le réalisme scientifique serait donc la seule position qui ne fasse pas du succès prédictif des sciences un miracle (Putnam 1979). C'est ce qu'on peut appeler l'« argument du miracle » (« no miracle argument »).

Cependant, l'antiréaliste peut faire valoir, à l'encontre de cet argument, que les anciennes théories aujourd'hui abandonnées prédisaient également avec succès ; pourtant, nous considérons maintenant qu'elles sont fausses. Or, on ne peut s'en tirer en affirmant que nos anciennes théories étaient « approximativement vraies », dans la mesure où il y a discontinuité dans la référence des termes théoriques entre les théories successives : les forces d'attraction gravitationnelles de la théorie de Newton ne sont pas les déformations de la courbure de l'espace-temps de la relativité générale. Par induction à partir des théories passées, nous avons toutes les raisons de croire que nos théories actuelles sont fausses. C'est ce qu'on appelle l'« argument de la méta-induction pessimiste » (Laudan 1981). Afin de résoudre cette tension entre deux arguments tirant dans des directions opposées, Worrall (1989) a proposé de réintroduire le réalisme structural.

Il s'agit d'une thèse dont l'origine remonte à des auteurs plus anciens, notamment à Russell, Carnap, Schlick ou Poincaré (voir Votsis 2012), et qui était alors formulée dans un cadre empiriste. Russell (1927, chap. 24), par exemple, avance l'idée que notre seul accès à la réalité passe par les objets de la perception directe (ou *sense-data*). Il affirme cependant que les relations entre *sense-data* nous permettent, par inférence, de connaître la structure relationnelle de la réalité. On pourrait donc être réaliste à propos de cette structure.

Worrall croit que cette thèse peut résoudre la tension qui anime le débat sur le réalisme scientifique de la manière suivante : d'une part, le fait que nos théories décrivent correctement la structure relationnelle de la réalité offrirait une explication suffisante à leur succès prédictif, et d'autre part, la continuité de structure entre les théories successives permettrait de répondre au problème de l'induction pessimiste,

en maintenant que nos anciennes théories, aujourd'hui abandonnées, étaient approximativement vraies quant à la structure qu'elles postulaient. En effet, lors des changements théoriques, certaines équations des anciennes théories sont explicitement importées dans le cadre des nouvelles (par exemple, les équations de la mécanique de Newton en relativité ou en mécanique quantique).

Cet argument permet de mieux saisir ce qu'il faut comprendre par « structure relationnelle » : il s'agirait des relations portées par les équations de nos théories. Worrall parle, par exemple, des équations de Maxwell comme décrivant correctement les relations existant entre les différentes composantes de la lumière. Ces relations correspondent donc aux lois de la nature.

En résumé, le réalisme structural nous propose d'être réaliste à propos des relations nomologiques postulées par nos théories, mais pas forcément à propos des objets ou des propriétés qui entrent en relation, et dont la conception peut évoluer ou qui peuvent disparaître de nos théories lors des changements théoriques.

3 – Le réalisme structural ontique

Ainsi formulé, le réalisme structural se présente comme une thèse épistémique portant sur les limites de la connaissance scientifique. Cependant, plusieurs auteurs comme Ladyman (1998) proposent d'en faire une thèse ontique qui porterait sur la nature de la réalité. Non seulement la structure relationnelle serait la seule chose qu'on pourrait connaître de la réalité, mais elle serait en fait « tout ce qui existe ». La nature serait elle même une structure relationnelle. Ces auteurs nomment cette position le « réalisme structural ontique » (OSR), par opposition au « réalisme structural épistémique » (ESR).

Le réalisme structural ontique consiste à affirmer que les relations sont les véritables objets primitifs de la réalité, tandis que les relata (les entités liées) n'auraient pas de nature propre : ils n'existeraient qu'en vertu des relations auxquelles ils prennent part. En d'autres termes, il s'agirait d'adopter une métaphysique de relations.

Pourquoi effectuer ce pas métaphysique ? On peut dénombrer trois motivations principales. La première voudrait que sous sa forme épistémique, le réalisme structural ne se différencierait pas réellement d'une position empiriste. C'est un argument qui a été formulé initialement de Newman (1928) à Russell, et remis au goût du jour par Demopoulos et Friedman (1985). Le réalisme structural de Russell s'appuie sur une conception extensionnelle des relations : les relations

sont des objets purement logico-mathématiques, sans qualifications, qu'on peut définir simplement par les entités qu'elles lient dans le monde. Si on conçoit les relations ainsi, affirmer qu'on connaît des relations entre entités inobservables grâce à leurs conséquences observables ne serait en fin de compte rien de plus qu'ordonner les phénomènes observables en une structure qui en décrit les régularités (pour peu que la réalité dispose de suffisamment d'objets pour soutenir cette structure)¹. Le réalisme structural épistémique n'affirmerait donc pratiquement rien de plus que ne le fait l'empirisme et serait incapable de rendre justice à l'argument du miracle, puisqu'il n'expliquerait pas réellement la capacité des théories à réaliser de nouvelles prédictions.

Il est possible d'échapper à cette objection en qualifiant ces relations (par exemple, de naturelles), mais on semble alors s'éloigner du réalisme structural. L'OSR échapperait cependant à l'objection en concevant les relations comme des entités primitives de la réalité, s'écartant ainsi d'une conception purement extensionnelle.

Une seconde raison invoquée pour soutenir l'OSR voudrait que la structure d'une théorie exprime des contraintes nomologiques ayant une force modale *de re* (Ladyman 1998). Elle exprimerait, par exemple, des rapports de nécessité physique ou des probabilités objectives (cette motivation peut être associée aux arguments à l'encontre des conceptions humiennes des lois de la nature, qui considèrent que les lois ne font que décrire des régularités factuelles). Les relations dont il est question sont donc substantielles : elles font davantage que de simplement ordonner des phénomènes ou des objets inobservables du monde actuel. Elles ne surviennent pas sur les éléments qu'elles lient. Le meilleur moyen de donner un sens à cet aspect substantiel serait d'en faire des objets primitifs de la réalité.

Enfin, l'OSR est motivé par certains aspects de la physique contemporaine, en particulier par le problème de l'identité des particules en mécanique quantique. Certaines particules dans un état intriqué peuvent être indiscernables : elles ont une relation bien définie, par exemple, le fait d'avoir des directions de spin opposées, mais sans qu'aucune des particules n'ait pour autant une direction de spin déterminée. Ces particules sont alors indiscernables quant à l'ensemble de leurs propriétés physiques, intrinsèques ou relationnelles, et leur permutation est indifférente quant aux prédictions empiriques. Sur le plan ontologique, la relation entre ces particules semble préexister aux particules elles-mêmes, qui ne seraient pas de véritables individus dotés d'une identité. Un principe de parcimonie ontologique est généralement invoqué pour soutenir cet argument : il est possible de restaurer l'identité des particules de manière ad hoc, mais le choix étant sous-déterminé, il conviendrait d'adopter la représentation la plus parcimonieuse, consistant à éliminer ces particules

1 - Le réalisme structural épistémique de Russell peut être exprimé à l'aide de phrases de Ramsey. L'objection de Newman prend alors la forme d'un théorème de logique : le contenu structural d'une théorie ainsi formulé est logiquement équivalent à l'ensemble de ses conséquences empiriques, auxquelles on ajoute une hypothèse de cardinalité sur les objets du monde.

individuelles au profit d'une structure de relations (French et Ladyman 2003).

Nous comptons donc différentes motivations pour estimer que la réalité serait une structure relationnelle. Cependant, l'OSR ne va pas sans poser des difficultés sur le sens qu'il est possible d'attribuer à cette conception des relations comme étant primitives par rapport aux éléments qu'elles lient. On peut se demander, par exemple, s'il est question de structure abstraite ou concrète. Il existe une certaine ambiguïté à ce sujet chez les défenseurs de l'OSR, (voir Psillos (2012). Cependant, plus récemment, French (2014) s'est attaqué à cette question de manière explicite). Par ailleurs, certains auteurs remarquent que les lois physiques s'appliquent à des entrées physiques, interprétées qualitativement dans un cadre expérimental, indépendamment des lois elles-mêmes (Cao 2003). Il est donc difficile de parler de relations autonomes : en l'absence de cet ancrage expérimental, pourrait-on vraiment différencier une relation physique d'une relation purement mathématique ? De quelle façon l'OSR se différencierait-il alors d'une forme de platonisme mathématique ?

Il me semble qu'une objection semblable pourrait être avancée par rapport à l'aspect modal des lois, c'est-à-dire sur le fait qu'elles expriment des relations d'ordre nomologique. En effet, il semble que parler de relations modales (par exemple, d'un rapport de nécessité) n'ait du sens que s'il existe également des phénomènes actuels, en sus de ces relations. Si on prend, par exemple, une loi probabiliste qui spécifie plusieurs résultats de mesures possibles, il est implicite qu'un et un seul de ces résultats sera actualisé, mais le résultat qui le sera n'est pas spécifié par la loi elle-même. Il est donc difficile d'affirmer que de telles relations épuisent la réalité, à moins d'être réaliste à propos des mondes physiquement possibles, c'est-à-dire de prétendre que tous les résultats sont en réalité actualisés. De façon générale, si une structure nomologique nous renseigne sur la structure des possibles, elle ne nous indique pas ce qui est actuel.

Toutes ces difficultés sont plus ou moins liées, en ce sens qu'elles concernent la question du rapport entre une structure théorique abstraite et les phénomènes concrets, actuels, qui en constituent la base expérimentale. Or, c'est précisément la question du rapport entre théorie et expérience qui se situe au cœur du problème de la mesure en mécanique quantique. Tournons-nous donc maintenant vers ce problème.

4 – Le problème de la mesure

Je présenterai ici le problème de la mesure dans le cadre de la mécanique quantique non relativiste, mais notons qu'il se pose également en des termes semblables en théorie quantique des champs.

En mécanique quantique, un système est représenté par une fonction d'onde. Il s'agit d'une structure mathématique qui peut se décomposer, relativement à une observable, en une superposition de composantes pondérées par des nombres complexes. Une observable correspond à une mesure possible du système (éventuellement composite), et chaque composante de la superposition peut être associée à un résultat possible pour cette mesure. Si on interprète la fonction d'onde de façon réaliste, on peut dire qu'elle décrit un système comme étant dans une superposition d'états pondérés relativement à chaque observable.

La fonction d'onde suit une loi d'évolution linéaire, ce qui implique notamment la persistance des superpositions d'états au cours du temps. Pourtant, nos mesures ont toujours des résultats bien déterminés : nous n'observons pas de superpositions d'états. Il manque donc un lien entre le modèle théorique et le résultat d'une expérience, qui est établi par une règle mathématique, la règle de Born. Cette règle permet de calculer la probabilité d'un résultat de mesure donné à partir de la fonction d'onde.

Néanmoins, la règle de Born ne correspond pas, a priori, à un processus physique qui se déroulerait dans l'espace et dans le temps. Il s'agit simplement d'une règle mathématique. Par ailleurs, le modèle ne s'interprète pas aisément comme un modèle épistémique qui refléterait notre ignorance d'un réel état sous-jacent (ce qu'on peut exprimer intuitivement par le fait que les différentes composantes de la fonction d'onde pour une observable qui n'est pas mesurée peuvent produire des interférences entre elles, et contribuent donc toutes statistiquement au résultat final : si la façon dont sera mesuré le système n'est pas spécifiée d'avance, il est alors justifié de penser que toutes les composantes d'une décomposition quelconque existent réellement avant la mesure). Le lien entre le modèle théorique et les résultats de mesure qui constituent la base expérimentale de la théorie reste donc mystérieux : il n'est pas explicité par la théorie d'une façon qui pourrait permettre une lecture directement réaliste de celle-ci, par exemple, en associant directement les résultats des mesures à des propriétés instanciées dans le modèle.

Ce problème peut s'exprimer, dans un cadre réaliste, sous la forme de trois propositions qui, prises ensemble, mènent à une contradiction (Maudlin 1995) :

1. La fonction d'onde est une description complète de l'état d'un système ;
2. La fonction d'onde suit une loi d'évolution linéaire ;
3. Pour chaque propriété mesurée, une seule valeur est obtenue.

Appliquant les deux premières propositions à un système composite qui serait constitué d'un sous système observé et d'un appareil de mesure, on arrive à la conclusion que l'appa-

reil de mesure lui même se trouve dans une superposition d'états à la fin de l'expérience, ce qui contredit la troisième proposition. Il nous faut donc abandonner l'une des trois propositions.

Cette formulation du problème permet de classer les différentes solutions réalistes possibles. Les solutions qui rejettent la proposition 1 complètent la structure de la théorie par des « variables cachées » correspondant, par exemple, à des particules ponctuelles qui sont mesurées lors des expériences (mécanique bohémienne, interprétations modales).

Les solutions qui rejettent la proposition 2 complètent la loi d'évolution de la théorie standard par une dynamique stochastique pouvant prendre la forme d'un « effondrement spontané de la fonction d'onde » sur l'une des valeurs possibles ou d'un processus de localisation discret ou continu (GRW, CSL).

Ces solutions ont l'inconvénient d'ajouter des structures à la théorie pour des besoins non empiriques, mais plutôt métaphysiques. Elles mènent de ce fait à un cas avéré de sous-détermination par l'expérience qui menace directement le réalisme scientifique : à propos de quelle théorie devrions-nous être réalistes² ? En raison de la non-localité de ces structures additionnelles (imposée par le théorème de Bell), elles font face de plus à des difficultés lorsqu'il est question de rendre compatibles ces nouvelles structures avec la théorie de la relativité, c'est-à-dire de les transposer dans la théorie quantique des champs.

Les solutions qui rejettent la proposition 3 proposent de rendre les résultats des mesures relatifs à des observateurs se situant dans des branches alternatives de l'univers : la détermination des résultats des mesures serait en réalité de l'ordre de l'illusion épistémique, tous les résultats possibles étant en fait actualisés. On y trouve notamment les interprétations de type mondes multiples. Cependant, ces solutions ne sont pas sans poser des difficultés. En effet, l'interprétation des mondes multiples semble rendre la notion de probabilité difficilement intelligible : pourquoi assigner des probabilités de mesures si tous les résultats sont en réalité actualisés ? Et pourquoi ces probabilités devraient-elles suivre la règle de Born ?

Certaines solutions ont été proposées, notamment la théorie de Deutsch-Wallace (Wallace 2007), mais elle s'appuie sur des probabilités subjectives et sur des principes de rationalité dont on peut penser qu'ils sont insuffisants pour justifier la base empirique de la théorie (Dawid et Thébault 2014). Une bonne théorie scientifique devrait être à même d'expliquer les

résultats empiriques, notamment les statistiques des résultats de mesures passés, mais il n'est pas certain qu'une théorie de type mondes multiples fondée sur une conception subjective des probabilités puisse offrir une telle explication. En effet, si on adopte la théorie de Deutsch-Wallace, les conséquences objectives de la théorie (qui comprennent tous les résultats de mesures possibles) aussi bien que les principes de rationalité invoqués sont parfaitement compatibles avec n'importe quels résultats de mesures passés.

Le problème de la mesure a amené certains auteurs à s'éloigner du réalisme scientifique, en proposant des solutions qui relativisent la fonction d'onde au sujet épistémique : soit en en faisant un objet purement épistémique, décrivant notre connaissance d'un système (ce qui amène à réviser les règles classiques d'inférence), soit en en faisant un objet décrivant les relations entre un système et un référentiel, ou encore entre un système observé et un système observateur (voir, par exemple, Rovelli 1996). On peut alors parler de « physique relationnelle ».

Le problème de la mesure pose donc un défi au réalisme scientifique : non seulement il y a sous-détermination par l'expérience, mais en plus, aucune solution réaliste n'est entièrement satisfaisante. La seule façon de rendre intelligible l'utilisation expérimentale des probabilités semble être de compléter la théorie de structures ne jouant aucun rôle prédictif, et menaçant la compatibilité de la théorie avec la relativité. Peut-être que de futurs développements résoudront définitivement ce problème. Cependant, les contraintes imposées par la théorie sont fortes, et grandement appuyées par les résultats empiriques³. Il y a donc de bonnes raisons d'être pessimiste quant aux perspectives purement réalistes, et de penser qu'il s'agit d'un problème profond qui exige certaines révisions d'ordre philosophique touchant directement à la question du réalisme et au statut de la représentation scientifique, plutôt qu'un simple aménagement théorique qui viserait à « sauver » le réalisme par l'ajout de structures ad hoc.

5 – Le réalisme structural face au problème de la mesure

Étant donné que le réalisme structural prétend établir un compromis entre le réalisme scientifique et l'empirisme, on pourrait penser qu'il est en bonne position pour éclairer le problème de la mesure. L'OSR propose d'adopter une métaphysique de relations : les éléments primitifs de la réalité seraient des relations modales, c'est à dire des relations d'ordre nomologique.

2 - Les théories GRW et CSL font des prédictions théoriquement différentes de la théorie standard, mais utilisent des paramètres libres qui sont ajustés de manière à être compatibles avec les confirmations expérimentales actuelles de la mécanique quantique. Tant qu'aucune expérience n'infirme la théorie quantique standard, la sous-détermination persiste.

3 - Notamment la violation des inégalités de Bell, dont la formulation repose sur des principes métathéoriques peu controversés, largement indépendants de la théorie quantique elle-même. La théorie qui succèdera à la mécanique quantique devra s'accommoder également de ces résultats.

Il semble assez naturel d'identifier cette structure modale à la fonction d'onde : après tout, la fonction d'onde est une structure de laquelle on dérive des contraintes sur les résultats des mesures possibles. Elle semble jouer un rôle nomologique. De plus, l'OSR s'appuie généralement sur des arguments mettant en avant la parcimonie ontologique en réponse à une sous-détermination (c'est le cas, notamment, à propos du problème d'identité des particules), ce qui joue en défaveur des options consistant à compléter la théorie de structures additionnelles à des fins métaphysiques.

L'approche qui semble la plus naturelle dans le cadre de l'OSR serait donc d'adopter une solution de type mondes multiples au problème de la mesure, puisque c'est la solution à laquelle on aboutit si on prend au sérieux la structure de la théorie et uniquement celle-ci : la fonction d'onde décrirait la structure des relations modales de la réalité, et ces relations seraient « tout ce qui existe »⁴.

On voit alors un parallèle se dessiner entre les difficultés rencontrées par l'OSR que nous avons évoquées et celles rencontrées par les interprétations de type mondes multiples. Il semble que ce type de positions ne permette plus d'établir un lien clair entre la réalité qu'elles postulent et l'expérience, ce qui se traduit notamment par le problème de l'interprétation des probabilités.

L'ESR fait peut-être mieux. Il consiste, tout comme l'OSR, à affirmer que l'objet de nos théories, ce sont des relations nomologiques. Mais si ces relations constituent le seul aspect connaissable de la réalité, elles n'épuisent pas cette réalité.

Suivant l'ESR, on peut proposer une solution au problème de la mesure qui consisterait à affirmer que la fonction d'onde est une description complète de l'état *connaissable* d'un système (à savoir sa structure relationnelle) et qu'elle suit une loi d'évolution linéaire. Pour autant, il n'est pas nécessaire de rejeter la troisième proposition, d'après laquelle les résultats des mesures sont déterminés : ces résultats concrets de mesures ne sont connaissables que par un constat empirique et sont interprétés qualitativement dans un cadre expérimental, si bien qu'ils dépassent, dans une certaine mesure, la seule structure relationnelle de la théorie. Nous pouvons les interpréter comme faisant partie des relata de cette structure. Suivant l'ESR, la structure relationnelle n'épuise pas la réalité : en effet, il peut exister des relata inconnus dans le monde responsables de l'actualisation des relations modales

en résultats de mesures actuels, ainsi que des relata qualitatifs, connaissables par accointance, associés aux résultats concrets des mesures⁵.

Là où par rapport à un réalisme scientifique standard l'OSR est a priori conservateur sur le plan épistémologique (il s'agit toujours d'un réalisme scientifique) mais révisionniste sur le plan métaphysique, l'ESR est révisionniste sur le plan épistémologique : il propose un amendement du réalisme scientifique ou sa restriction à certains aspects de la réalité : les structures relationnelles. C'est cet aspect qui s'avère crucial quand il s'agit d'éclairer le problème de la mesure : ce problème se poserait précisément parce que notre connaissance de la réalité est incomplète.

Cependant, on perd alors les bénéfices de l'OSR, et notamment son accord avec d'autres aspects de la physique contemporaine, comme le problème de l'identité des particules. De plus, reste toujours la question de savoir si une telle proposition ne serait pas finalement qu'une forme d'empirisme : nous retomberions alors sur une position philosophique trop faible pour expliquer le succès des prédictions scientifiques, ce qui, certes, résoudrait le problème de la mesure, mais serait peut-être un prix trop important à payer.

6 – Peut-on établir un compromis entre l'ESR et l'OSR ?

Peut-on obtenir une solution de compromis qui conserverait les avantages des deux positions sans en présenter les inconvénients ? Il me semble que c'est possible, en distinguant deux thèses caractéristiques différenciant l'OSR de l'ESR :

1. Pour l'OSR, les relations sont ontologiquement primitives. Pour l'ESR, elles surviennent sur l'arrangement d'entités inaccessibles de la réalité.
2. Pour l'OSR, les relations épuisent la réalité. Pour l'ESR, elles constituent uniquement ce qui est connaissable de la réalité.

Or, on peut prétendre que la première thèse de l'OSR joue un rôle essentiel dans les arguments qui motivent cette position, alors que la seconde se trouve à la source de ses difficultés. À l'inverse, la première thèse de l'ESR semble se situer à la source de ses difficultés, quand la seconde constitue une de

4 - Un autre argument en faveur d'une telle interprétation est que les éléments que la mécanique bohmienne propose d'ajouter à la théorie sont difficilement assimilables à des « relations modales » : il s'agit de particules ponctuelles dont l'évolution est déterminée par une onde pilote, mais ces particules ne déterminent pas en retour l'évolution de l'onde pilote et ne jouent donc aucun rôle nomologique. On pourrait élaborer un argument similaire envers les propositions consistant à compléter GRW d'une « ontologie primitive », à savoir des « flashes » ou une densité de matière (Allori et al. 2008) : ces approches semblent plutôt opposées à l'esprit qui motive OSR. Cependant pour un avis différent, voir Esfeld (2013).

5 - Il s'agit bien sûr d'une formulation relativement vague, mais dans l'esprit du réalisme structural de Russell, suivant lequel ce sont les relations entre phénomènes observables qui nous permettent d'inférer les relations entre entités réelles. Si on transpose cette thèse au problème de la mesure, on semble alors se rapprocher des solutions de type physique relationnelle, puisque la structure qu'il est possible d'inférer dépend de notre perspective épistémique sur le monde. Il s'agit là de quelques pistes, données à titre programmatique, qu'il conviendrait d'approfondir.

ses principales motivations.

La première thèse de l'OSR est l'idée que les relations sont ontologiquement primitives et qu'elles expriment des modalités *de re*. Elles sont davantage que de simples relations logico-mathématiques définies extensionnellement par les objets qu'elles lient.

Nous avons vu que c'est cette conception substantielle des relations qui permet d'échapper à l'objection de Newman à l'égard de l'ESR. Concevoir les relations de façon extensionnelle comme liant des objets observables et des objets inobservables de la réalité revient, ni plus ni moins, qu'à organiser nos observations à la manière d'un empiriste. Mais si on admet que ces relations expriment des contraintes modales *de re* sur les phénomènes plutôt qu'elles n'en décrivent les régularités, alors nous postulons davantage que l'empiriste et nous sommes à même d'expliquer la capacité des théories à réaliser de nouvelles prédictions⁶. Cet aspect modal constitue par ailleurs la seconde motivation importante de l'OSR que nous évoquions, et on constate que ces deux motivations ne sont pas indépendantes.

Enfin, c'est encore la notion de relation ontologiquement primitive qui est évoquée face au problème de l'identité des particules. On peut observer à ce sujet que l'idée voulant que certaines relations entre des particules intriquées priment sur les particules elles-mêmes n'est pertinente que dans le cas où les particules ont des propriétés indéterminées. Dans ce cadre, l'indétermination peut être levée par des mesures futures, à la suite desquelles les deux particules seront enfin différenciées. Autrement dit, cette solution n'est pertinente que s'il s'agit encore une fois de postuler des relations modales contraignant les mesures possibles.

À aucun moment pourtant il n'est nécessaire, dans ces arguments, de postuler que les relations épuisent la réalité. Au contraire, c'est cette deuxième thèse qui semble entraîner la plupart des difficultés de l'OSR : si seule existe une structure relationnelle, on semble en peine de distinguer structure mathématique de structure physique. Au contraire, la deuxième thèse de l'ESR joue un rôle important. Il s'agit d'affirmer que seules les relations sont connaissables. Cette affirmation est d'abord motivée par l'empirisme, qui veut ancrer la connaissance dans l'expérience, rejetant l'idée que nous ayons accès à la nature fondamentale de la réalité. On échappe alors d'emblée à la menace du platonisme mathématique. C'est également cette thèse que nous avons utilisée pour répondre au problème de la mesure.

On voit donc une solution de compromis se dessiner : elle consisterait à adopter la première thèse de l'OSR, suivant laquelle les relations sont modales et ontologiquement primitives, et à adopter la seconde thèse de l'ESR, d'après laquelle

ces relations n'épuisent pas la réalité, mais constituent ce qui est connaissable de la réalité. On aboutirait alors à un réalisme structural ontique modéré, qui prétend qu'il existe des relations modales, ontologiquement primitives, établissant des contraintes nomologiques sur des relata non structuraux, qualitatifs. Ces relations sont l'objet de la connaissance scientifique et sont décrites par les structures mathématiques de nos théories, tandis que les relata ne peuvent être éventuellement connus qu'à l'issue d'un constat empirique.

À ce stade, il convient de préciser cette position, d'abord en spécifiant ce qu'on entend par « relations modales », et quelles modalités sont impliquées exactement, puis en qualifiant ces relata non structuraux. Il existe plusieurs façons de répondre à chacun de ces deux points, mais les examiner en détail dépasse le cadre de cet article. Nous pouvons cependant fournir quelques pistes.

Le premier point, celui concernant le statut des relations modales, se pose également aux partisans de l'OSR. À ce sujet, on trouve dans la littérature philosophique plusieurs options (voir French 2014, chap. 9) : on peut, par exemple, adopter un primitivisme à propos des lois de la nature, ou encore adopter un dispositionnalisme (les lois scientifiques décrivent le profil causal des propriétés physiques), auquel cas la structure des théories scientifiques correspondrait à la structure causale de la réalité. De nombreux auteurs pensent que la notion de causalité ne peut avoir de sens sans entités (objets ou événements) susceptibles de porter les relations causales (par exemple, Psillos 2006). C'est un problème pour l'OSR, mais pas pour notre position, qui accepte l'existence de relata.

Concernant le second point, à savoir le statut des relata non structuraux, on pourra remarquer que les relata de la structure jouent plusieurs rôles dans les arguments précédents : d'une part, ce sont eux qui nous permettent de faire la différence entre une structure mathématique abstraite et une structure physique concrète, en ancrant nos théories dans la pratique expérimentale. Ces relata constituent donc la base empirique concrète à partir de laquelle nous pouvons acquérir une connaissance scientifique. D'autre part, dans le cadre du problème de la mesure, on doit pouvoir les tenir responsables de l'instanciation de résultats de mesures déterminés. En effet, si les relations modales représentées par la fonction d'onde existent dans la réalité, nous avons vu qu'elles ne suffisent pas à déterminer ce qui est actuel.

Encore une fois, plusieurs options sont possibles. La première consisterait à adopter une approche métaphysique en spécifiant la catégorie ontologique à laquelle pourraient appartenir ces relata : par exemple, des événements qui correspondraient à l'instanciation d'actualités, ou encore des objets inobservables dotés de propriétés qualitatives. Le risque

6 - À ce titre, notons que Melia et Saatsi (2006) proposent de prendre au sérieux l'idée de nécessité physique par l'usage de la logique intensionnelle au sein du formalisme des phrases de Ramsey, ce qui permettrait d'échapper à la transposition du problème de Newman sous forme de théorème logique.

ici est de retomber dans le type de sous détermination que le réalisme structural promettait de résoudre. Par ailleurs, il faudrait parvenir à distinguer ce type de spéculations des autres solutions proposées au problème de la mesure, qui consistent elles aussi à postuler des objets ou des événements en plus de la structure théorique, afin d'éviter de tomber dans les mêmes travers. Une solution pourrait consister à adopter un agnosticisme quant à la nature de ces relata.

Une option, peut-être plus prometteuse, consisterait, dans un esprit empiriste, à affirmer que les théories scientifiques nous renseignent uniquement sur la structure des relations modales entre observations possibles (on pourrait qualifier cette position « d'empirisme modal »). Après tout, l'espace de Hilbert, au sein duquel on définit une fonction d'onde, s'interprète aisément comme une structure d'observables, et si on est prêt à associer ces observables à nos observations, la fonction d'onde peut s'interpréter comme un ensemble de corrélations entre observations possibles. Si la structure n'épuise pas la réalité, c'est que ces relations entre observations possibles ne nous disent pas quelles observations sont actuelles. Ce type de solution exige de pouvoir définir précisément la distinction entre observable et inobservable, au risque de l'anthropocentrisme. Cependant, en acceptant que la structure qu'il est possible d'inférer dépend de notre perspective épistémique sur le monde, nous nous rapprochons des solutions de type physique relationnelle au problème de la mesure, qui relativisent la fonction d'onde aux référentiels ou systèmes observateurs (bien que ce rapprochement mériterait d'être élaboré). La façon dont cette position se distingue des options purement réalistes a le mérite d'être plus claire.

Quelle que soit la solution choisie, il resterait à expliquer en quoi ces relations exprimant des modalités *de re* sont connaissables, mais ce problème n'est pas forcément insurmontable. Il se pose à quiconque défend une conception non humienne des lois naturelles comme étant plus que de simples descriptions de régularités factuelles.

7 – Conclusion

Le réalisme structural a été réintroduit dans le débat contemporain dans le but de proposer un compromis entre le réalisme scientifique et l'empirisme. Nous voyons pourtant que ce débat n'est pas entièrement résolu par le réalisme structural : il semble se prolonger au sein de ce dernier, sous la forme d'une opposition entre réalisme structural ontique ou épistémique. Tous deux répondent, certes, au défi de l'induction pessimiste, mais le premier menace de se ramener à une forme de platonisme mathématique en perdant le rapport à l'expérience, quand le second peine à se distinguer d'une forme d'empirisme et à véritablement expliquer le succès prédictif des sciences. Ces difficultés peuvent se transpo-

ser au problème de la mesure en mécanique quantique, qui concerne lui aussi la question du rapport entre modèles théoriques et expérience.

Une solution de compromis est possible, qui combine l'adhésion aux modalités *de re* du réaliste (justifiée par « l'argument du miracle ») et l'humilité épistémique de l'empiriste (permettant de conserver le lien avec l'expérience). Une telle solution permettrait, en outre, d'éclairer le problème de la mesure en mécanique quantique, en dirigeant notre attention sur les interprétations relationnelles. Elle demanderait à être approfondie, mais peut-être pourrait-elle, pour reprendre les termes de Worrall, nous offrir le meilleur des deux mondes.

RÉFÉRENCES

- ALLORI, Valia, GOLDSTEIN, Sheldon, TUMULKA, Roderich, ZANGHI, Nino. 2008. On the common structure of Bohmian mechanics and the Ghirardi–rimini–weber theory: Dedicated to Giancarlo Ghirardi on the occasion of his 70th birthday. *British Journal for the Philosophy of Science*, 59(3), 353–389. [Article](#).
- CAO, Tian Yu. 2003. Can We Dissolve Physical Entities into Mathematical Structures? *Synthese*, 136(1), 57–71. [Article](#).
- DAWID, Richard, THÉBAULT, Karim. 2014. Against the empirical viability of the Deutsch–Wallace–Everett approach to quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 47, 55–61. [Article](#).
- DEMOPOULOS, William, FRIEDMAN, Michael. 1985. Bertrand Russell's the Analysis of Matter: Its Historical Context and Contemporary Interest. *Philosophy of Science*, 52(4), 621–639. [Article](#).
- ESFELD, Michael. 2013. Ontic structural realism and the interpretation of quantum mechanics. *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 19–32. [Article](#).
- FRENCH, Steven. 2014. *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*. Oxford : Oxford University Press. [Livre](#).
- FRENCH, Steven, LADYMAN, James. 2003. Remodelling structural realism: Quantum physics and the metaphysics of structure. *Synthese*, 136(1), 31–56. [Article](#).
- LADYMAN, James. 1998. What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, 29, 409–424. [Article](#).
- LAUDAN, Larry. 1981. A Confutation of Convergent Realism. *Philosophy of Science*, 48(1), 19–49. [Article](#).
- MAUDLIN, Tim. 1995. Three Measurement Problems. *Topoi*, 14(1), 7–15. [Article](#).
- MELIA, Joseph, SAATSI, Juha. 2006. Ramseyfication and Theore-

HISTORIQUE

Article initialement soumis le 30 janvier 2015.

Article révisé soumis le 5 juin 2015.

Article accepté le 21 août 2015

SITE WEB DE LA REVUE

sites.uclouvain.be/latosensu/index.php/latosensu/index

ISSN 2295-8029 <http://dx.doi.org/10.20416/lrsps.v3i1.233>

DOI <http://dx.doi.org/10.20416/lrsps.v3i1.233>



SOCIÉTÉ DE PHILOSOPHIE DES SCIENCES (SPS)

École normale supérieure

45, rue d'Ulm

75005 Paris

www.sps-philoscience.org

LE RÉALISME STRUCTURAL
FACE AU PROBLÈME DE LA
MESURE

tical Content. *British Journal for the Philosophy of Science*, 57(3), 561–585. [Article](#).

NEWMAN, Maxwell. 1928. Mr. Russell's Causal Theory of Perception. *Mind*, 5(146), 26–43. [Article](#).

PSILLOS, Stathis. 2006. The Structure, the Whole Structure, and Nothing but the Structure? *Philosophy of Science*, 73(5), 560–570. [Article](#).

PSILLOS, Stathis. 2012. Adding Modality to Ontic Structuralism: An Exploration and Critique. In LANDRY, Elaine M., RICKLES, Dean P. (eds.), *Structural Realism: Structure, Object, and Causality*. Dordrecht : Springer. [Chapitre](#)

PUTNAM, Hilary. 1979. *Mathematics, Matter, and Method*. New York : Cambridge University Press. [Livre](#).

ROVELLI, Carlo. 1996. Relational Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35, 1637–1678. [Article](#).

RUSSELL, Bertrand. 1927. *L'Analyse de la matière*. Paris : Payot.

VOTSIS, Ioannis. 2012. Tracing the Development of Structural Realism. Disponible sur le site de l'auteur: http://www.votsis.org/PDF/Structuralism_in_Natural_Science.pdf

WALLACE, David. 2007. Quantum Probability From Subjective Likelihood: Improving on Deutsch's Proof of the Probability Rule. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(2), 311–332. [Article](#).

WORRALL, John. 1989. Structural Realism: The Best of Both Worlds? *Dialectica*, 43(1-2), 99–124. [Article](#).

CONTACT ET COORDONNÉES :

Quentin Ruyant

Institut supérieur de philosophie
Université catholique de Louvain
Place Cardinal Mercier 14, Bte L3.06.01
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

UFR de philosophie, Université de Rennes 1
Campus de Beaulieu - Bâtiment 32 B
Avenue du Général Leclerc - CS 74205
35065 Rennes CEDEX, France

quentin.ruyant@gmail.com

